

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15083

研究課題名（和文）泥岩を含む盛土の地震時挙動に及ぼすスレーキングの影響解明と健全度評価指標の提案

研究課題名（英文）Study on effects of slaking on seismic behaviour of embankments including mudstones and their soundness evaluation indexes

研究代表者

榎本 忠夫（Enomoto, Tadao）

茨城大学・理工学研究科（工学野）・准教授

研究者番号：70727180

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：泥岩粒子を含む砂の浸水やスレーキングに伴う骨格構造の劣化が砂の動的挙動や剛性に及ぼす影響を定量的に評価するため、系統的な三軸液状化試験を主として行った。その結果、砂の液状化強度、液状化後の非排水強度、剛性は泥岩粒子含有率の影響を大きく受けること、泥岩粒子をわずかに含んでいてもこれらの強度は大きく低下することを明らかにした。また、泥岩粒子の浸水やスレーキングにより生じる砂の骨格構造の劣化に関するメカニズムを解明した。さらに、S波速度をモニタリングすることで泥岩を含む盛土の骨格構造の健全度を評価できる可能性があることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

泥岩に関する既往の研究は、泥岩粒子集合体の変形特性や静的な強度特性を解明した事例が多かった。本研究では、泥岩粒子を含む砂の液状化特性、液状化後の強度変形特性、微小ひずみ領域における剛性、骨格構造の劣化メカニズム等を明らかにしたことで、新たな工学的知見を創出した点において学術的意義がある。また、破碎した泥岩は浸水により強度が大きく低下するが、浸水の影響を受けなければ比較的良い地盤材料であることや、環境に配慮して破碎泥岩を積極的に活用する際の注意事項を示した点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：A series of undrained cyclic triaxial liquefaction tests was mainly conducted to quantitatively evaluate the effects of the immersion-/slaking-induced degradation of crushed mudstones on dynamic behaviour and small strain properties of sands containing crushed mudstones. The test results mainly showed that: 1) the liquefaction resistance, the post-liquefaction undrained strength, and the small strain stiffness were largely affected by mudstones content; and 2) these strengths decreased remarkably under even a small amount of crushed mudstones. The present study also revealed the possible mechanisms on the immersion-/slaking-induced degradation of the skeleton structure for sands containing crushed mudstones. In addition, it is shown that the soundness of embankments containing crushed mudstones can be evaluated by monitoring the changes in the shear wave velocities measured by the in-situ PS logging tests.

研究分野：地盤工学、土質力学

キーワード：泥岩 スレーキング 三軸液状化試験 微小ひずみ領域における剛性 骨格構造の劣化メカニズム S波速度 排水・非排水三軸圧縮試験 一次元圧縮試験

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

盛土をはじめとした土構造物に利用された泥岩は、乾燥と湿潤の長期的繰返し作用によって風化が促進され粒子が徐々に細粒化し（スレーキング）、生じた局所的な緩みが土構造物内の健全部の骨格をも劣化させ地震による被害を引き起こし得る。2009年の駿河湾地震による東名高速道路盛土の崩壊はその典型的な例である。また、泥岩のスレーキングにより生じた砂や細粒分が液状化被害のトリガーにもなり得る。このような泥岩を含んだ土構造物の耐震性を正確に評価するためには、スレーキングの進行度や泥岩含有率に依存する骨格構造の劣化メカニズムや、その劣化が土要素の動的挙動に及ぼす影響を明らかにする必要がある。しかし、泥岩に関する既往の研究は、一次元圧縮試験による変形特性や三軸圧縮・一面せん断試験による静的な強度変形特性を扱った例が非常に多く、泥岩を含む地盤材料の動的挙動についてはよく分かっていない。

2. 研究の目的

本研究では、室内土質試験により、泥岩を含む土のスレーキングに伴う骨格構造の劣化メカニズムを解明するとともに、その劣化が土要素の動的挙動に及ぼす影響を定量的に評価する。また、泥岩を含む盛土の骨格構造の健全度を評価できる指標を検討する。

3. 研究の方法

(1) 採取した泥岩のスレーキング試験

本研究では、福島県内の実盛土から採取した泥岩を各種試験に用いた。当該泥岩の耐久性を調査するため、NEXCO (2015)を参考に促進スレーキング試験を実施した。また、盛土表層等の実環境下におけるスレーキング現象を再現する目的で、屋外にて1年間に及ぶ泥岩粒子の暴露試験を実施した（以下、長期スレーキング試験）。当該試験では、底に小さな穴が空いている4つの容器上にそれぞれ8つの泥岩粒子（粒径幅 37.5~19 mm）を等間隔に並べ、2022年6月3日にこれらの容器を雨量計とともに屋外に設置し1年間にわたって細粒化の様子を観察した。

(2) 非排水繰返し三軸試験（三軸液状化試験）

上記(1)の泥岩を細かく破碎した粒子（粒径幅 2~0.85 mm）と三河珪砂 V3号（主要な粒径幅 2~0.85 mm）を混合し、泥岩粒子含有率 M_c （全質量に対する泥岩粒子の質量）が 0, 2, 5, 10, 20, 30, 50%になるように調整した試料（それぞれ Mudstone 0%, 2%, 5%, 10%, 20%, 30%, 50%）を用いた。実験にはひずみ制御型三軸試験機を用いた。

Mudstone 0%の相対密度 $D_{r0} = 40\%$ (60%) に相当する間隙比 $e_0 = 0.857$ (0.798) となるように空気乾燥試料を5層に分けて突き固め、直径 7 cm、高さ 15.5 cm の供試体を作製した。供試体作製後、間隙を CO_2 にて置換し、初期有効拘束圧 $\sigma'_0 = 80 \text{ kPa}$ まで等方圧縮した。この時の供試体の側方変位量はクリップゲージにより測定した。等方圧縮中の $\sigma'_0 = 20, 50, 80 \text{ kPa}$ の応力状態において30分以上の排気クリープを実施した後、供試体側面に設置した LDT により測定した軸ひずみ両振幅が 0.001%程度の微小な繰返し载荷を行った。得られた応力~ひずみ関係の傾きから微小ひずみ領域における鉛直ヤング率 E_{vs} を算出した。また、 E_{vs} を測定した応力状態にて、供試体側面に設置した加速度計を用いて供試体内を伝播する S 波速度 V_s を測定した。 $\sigma'_0 = 80 \text{ kPa}$ での E_{vs} と V_s の測定後、脱気水を用いて通水を2時間実施した。通水後、再び E_{vs} と V_s の測定を行い、背圧を作用させて飽和化を図った（間隙係数 $B \geq 0.96$ ）。その後、所定の応力比にて軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_v = 0.2 \text{ \%}/\text{min}$ による非排水繰返し载荷を行い、軸ひずみ両振幅 $\epsilon_{v(DA)}$ と過剰間隙水圧比 R_u (=過剰間隙水圧 $\Delta u / \sigma'_0$) がそれぞれ 5%、0.95 を超えた段階で载荷をやめ、軸差応力を $q = 0 \text{ kPa}$ に戻した後、 $\dot{\epsilon}_v = 0.2 \text{ \%}/\text{min}$ にて軸ひずみ $\epsilon_v = 25\%$ までの非排水単調圧縮载荷を行った。

いくつかの供試体では、初回の通水後、 $\sigma'_0 = 80 \text{ kPa}$ を保ったまま 10 kPa の負圧による 140 時間の乾燥作用を与え、再び同時間の通水と乾燥作用を与えることでスレーキングを進行させ、飽和化した後、同様な液状化試験を実施した。なお、各作用の終了後には E_{vs} と V_s の測定も行った。

(3) 圧密非排水/圧密排水三軸圧縮試験

上記(2)の7種類の試料を用いて(2)と同じ方法にて作製した供試体に対して、 $\sigma'_0 = 80 \text{ kPa}$ の下で $\dot{\epsilon}_v = 0.2 \text{ \%}/\text{min}$ による圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。また、 $M_c = 100\%$ （以下、Mudstone 100%）の試料を用いて(2)と同じ方法にて作製した供試体に対して、飽和化した場合と通水を実施せず空気乾燥状態のままの場合について、 $\sigma'_0 = 80 \text{ kPa}$ の下で $\dot{\epsilon}_v = 0.02 \text{ \%}/\text{min}$ による圧密排水三軸圧縮試験を実施した。

(4) 一次元圧縮試験

スレーキングによる骨格構造の劣化メカニズムを明らかにするため、粒径 3 mm のガラスビーズと粒径 3~4 mm の泥岩粒子を混合した $M_c = 0, 20, 40, 60, 80, 100\%$ の試料を用いて、直径 5 cm、高さ 10 cm のアクリル円筒内に間隙比一定の供試体を作製した。有効上載圧 200 kPa の条件下で、2時間の通水作用と 10 kPa の負圧による 45 時間の乾燥作用を1サイクルとし、この乾湿作

用を3サイクル与えた。さらに、有効上載圧 400 kPa の下でもう1サイクルを供試体に与えた。各作用の終了後には微小繰返し载荷により剛性を評価した。しかし、供試体が円筒形であることや使用した粒子の粒径が比較的小さいため、一次元圧縮下における泥岩粒子の細粒化過程の可視化については課題が残った（紙面の関係上、本実験結果は省略。当該内容で論文発表済み）。

そこで、幅 5 cm、奥行き 5 cm、高さ 10 cm の直方体のモールドを新たに作製するとともに、粒径 5 mm のガラスビーズと粒径幅 4.75~4 mm の泥岩粒子を使用することで、泥岩粒子の細粒化過程の可視化を容易にした。 $M_c = 20, 40\%$ になるように両者を混合し、ガラスビーズ集合体の相対密度 $D_{r0} = 60\%$ に相当する間隙比 $e_0 = 0.744$ となるように空気乾燥試料を5層に分けて突き固めて供試体を作製した。鉛直荷重 50 kPa を载荷し、湿潤過程として2時間の通水を実施した後、有効上載圧を 50 kPa に保ったまま 10 kPa の負圧をかけ供試体の変位が収束するまで乾燥作用を与えた。この湿潤・乾燥作用を1サイクルとし、当該作用を供試体に計3サイクル与えた。

4. 研究成果

(1) 採取した泥岩のスレーキング試験結果

NEXCO (2015)を参考に実施したスレーキング試験の結果、本研究で使用した泥岩のスレーキング率は100%であった。また、長期スレーキング試験の結果を図1に示す。降雨を経験する度に泥岩粒子の細粒化が進行していき4週間経過した段階でスレーキング率が約95%に至ったこと、16週間が経過するまでに細粒分含有率が約18%増加したこと、1年経過時にはスレーキング率が100%に至っており細粒分含有率が約31%になったことなどを明らかにした。

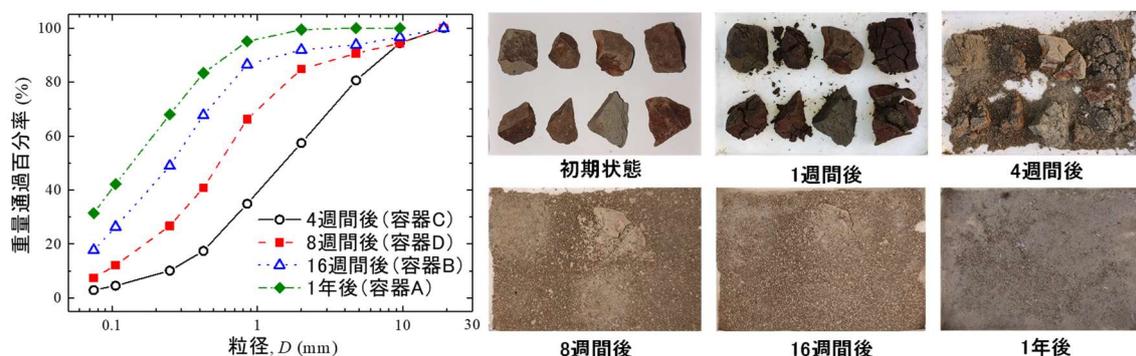


図1 長期スレーキング試験の結果 (写真：容器A)

(2) 液状化特性

液状化強度曲線を図2に示す。各試料に対して3供試体を実験に用い、それぞれのデータを線形近似した。同図の繰返し回数 $N_c = 20$ の時の繰返し応力比を液状化強度 R_L として、 M_c に対してプロットしたものが図3である。 $M_c \leq 20\%$ では、通水により供試体の間隙比が大きく減少したにもかかわらず、 R_L は M_c の増加とともに大きく減少した。特に、Mudstone 2%の R_L は Mudstone 0%よりも約13%低下しており、わずかな泥岩粒子含有率であってもその影響は大きいことが分かる。また、 $M_c > 20\%$ では R_L が増加に転じた。

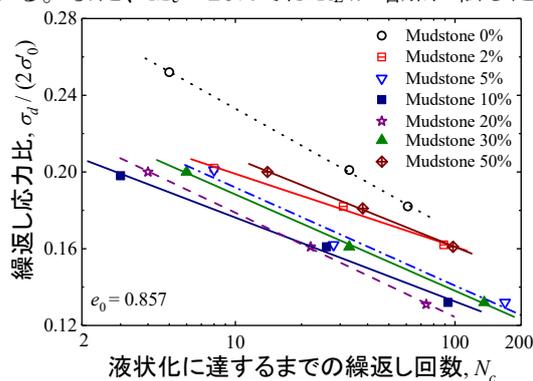


図2 液状化強度曲線

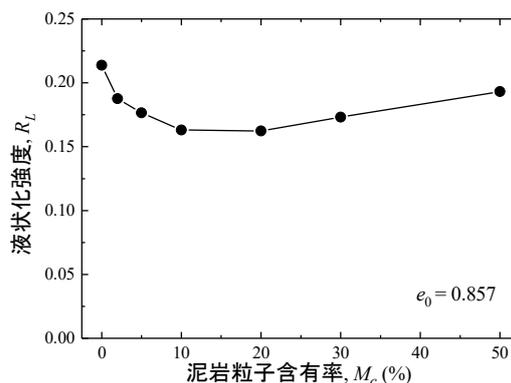


図3 液状化強度と泥岩粒子含有率の関係

(3) 液状化後の非排水せん断挙動

同じ繰返し応力比 $\sigma_d / (2\sigma'_v) = 0.2$ にて液状化試験を行った後、非排水状態で単調载荷を実施した際の結果を図4に示す。図5は、 $\varepsilon_v = 15\%$ における液状化後の非排水強度 $(q_{15\%})_A$ と M_c の関係である。 $M_c \leq 20\%$ では、 $(q_{15\%})_A$ は M_c の増加とともに大きく減少しており、Mudstone 2%の $(q_{15\%})_A$ は Mudstone 0%よりも約45%低下した。わずかな泥岩粒子含有率であっても $(q_{15\%})_A$ に及ぼす影響は大きいことが分かる。 $M_c > 20\%$ では M_c の増加とともに $(q_{15\%})_A$ がわずかに増加する傾向にあったが、 $M_c \geq 10\%$ における極端に低い $(q_{15\%})_A$ は、泥岩を含む砂質土で構築された土構造物の液状化後における流動崩壊の危険性を示唆している。

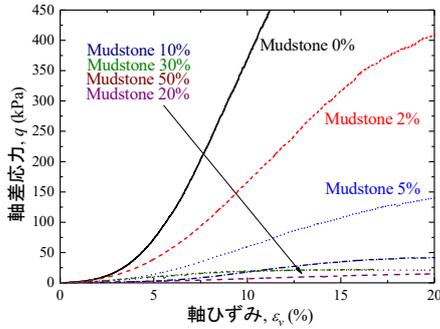


図4 液状化後の非排水せん断挙動

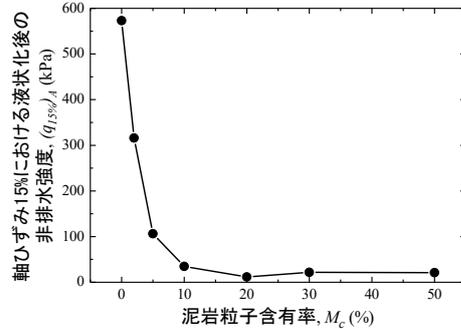


図5 液状化後の非排水強度と泥岩含有率との関係

(4) 液状化履歴を与えない場合の非排水せん断挙動

図6は、液状化履歴を与えない場合の供試体に対して圧密非排水三軸圧縮試験を行った結果を示している。図7は、当該試験にて得られた最大軸差応力 $(q_{max})_B$ と M_c の関係である。 $M_c \leq 20\%$ では、通水により供試体の間隙比が大きく減少したにもかかわらず、 $(q_{max})_B$ は M_c の増加とともに大きく減少した。特に、Mudstone 2%の $(q_{max})_B$ はMudstone 0%よりも約37%低下しており、わずかな泥岩粒子含有率であってもその影響は大きいことが分かる。また、 $M_c > 20\%$ では $(q_{max})_B$ がわずかに増加する傾向にあった。

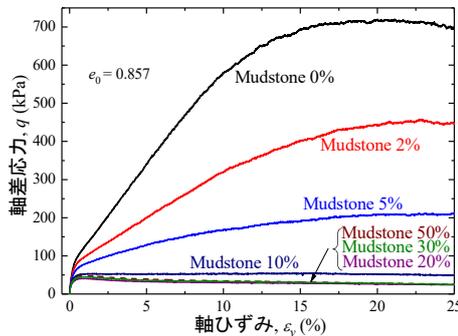


図6 圧密非排水三軸圧縮試験の結果

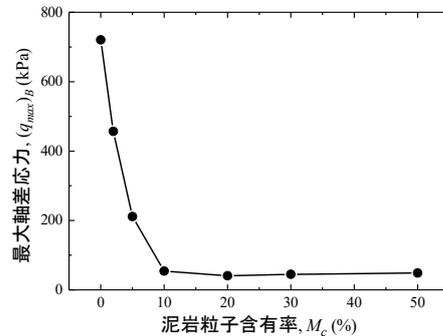


図7 非排水強度と泥岩粒子含有率との関係

(5) $M_c \leq 20\%$ における液状化強度と非排水せん断強度の低下の原因 (劣化メカニズム)

図8は、Mudstone 100%について、飽和化した供試体(M100-1)と空気乾燥状態の供試体(M100-2)に対して圧密排水三軸圧縮試験を実施した際の結果を示している。M100-1は通水により間隙比が0.847から0.477に大きく減少したにもかかわらず、 $\varepsilon_v = 15\%$ におけるM100-1の強度はM100-2よりも約39%低下した。図9に、 $M_c = 20\%$ における一次元圧縮試験の結果を示す。同図から、初回の通水により泥岩粒子が崩れ細粒化していることや、柔らかくなった泥岩粒子が変形していることが分かる。以上の結果から、 $M_c \leq 20\%$ における液状化強度と非排水せん断強度の低下は、通水の影響による泥岩粒子の劣化が原因であることが示唆される。

一方で、M100-2は比較的高い強度を示していることから、破碎した泥岩は浸水の影響を受けなければ比較的良い地盤材料であることが窺える。したがって、破碎泥岩は地下水位よりも上側の位置や浸水の影響を受けない箇所に使用すべきであり、十分な排水施設の設置も重要である。

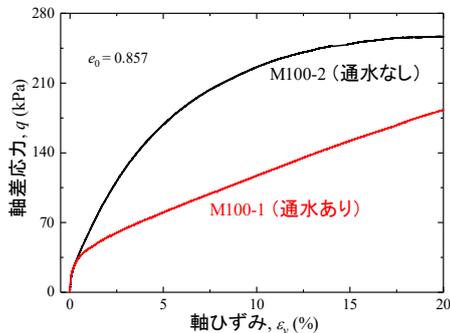


図8 排水三軸圧縮試験の結果

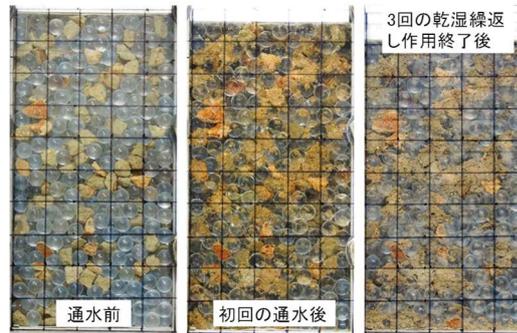


図9 一次元圧縮試験の結果

(6) $M_c > 20\%$ における液状化強度の増加の原因

3.(2)の三軸液状化試験後の供試体を用いて粒度試験を行った結果を図10に示す。試験前にはほとんど存在しなかった粒径0.425 mm以下の粒子の量は、試験後には M_c の増加とともに増えており、Mudstone 50%では重量比で約20%に達した。実験に用いた泥岩(0.425 mm以下)の塑性指数 I_p は27.5であり、通水による泥岩粒子の細粒化に伴い供試体全体の塑性指数が増加したことが $M_c > 20\%$ における液状化強度の増加に寄与していると考えられる。一方で、通水に伴う間隙比の顕著な減少は液状化強度の増加に寄与していないことが図11より推察された。図11

は、 $e_0 = 0.857, 0.798$ を有する供試体に対して $\sigma_d/(2\sigma'_v) = 0.2$ にて液状化試験を行った際の N_c と M_c の関係である。 $M_c \geq 20\%$ では、 $e_0 = 0.857$ と 0.798 の間における N_c の差は相当に小さくなっている。したがって、通常の砂とは異なり、 M_c が大きくなるにつれて間隙比の減少が液状化強度に及ぼす影響は小さくなると考えられる。

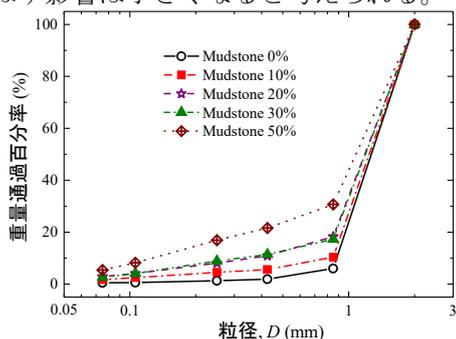


図 10 三軸液状化試験後の粒度分布

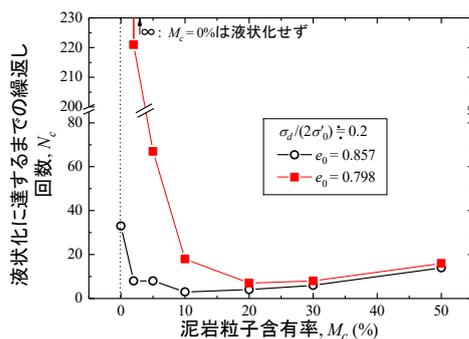


図 11 液状化強度に及ぼす初期間隙比の影響

(7) 砂質土の微小ひずみ領域における変形特性に及ぼす泥岩粒子の影響

図 12 は、 E_{vs} と V_s に及ぼす M_c の影響を示している。通水前に測定された両パラメータは、測定時の有効拘束圧の大きさに関係なく M_c の増加とともに大きく減少する傾向にあった。特に、Mudstone 0%と比較して Mudstone 100%の E_{vs} と V_s はそれぞれ約 55%、約 5~15%小さかった。この結果は、通水前であっても、内部間隙を有する泥岩粒子自体の剛性は砂粒子よりも低いことを示唆している。また、図 12 より、 $\sigma'_v = 80$ kPa における通水の後に測定した E_{vs} と V_s は M_c の増加とともに大きく減少しており、いくつかの試験においては、両者の値は通水前の $\sigma'_v = 50$ kPa にて測定した値とほとんど同じかそれ以下になっていることが分かる。

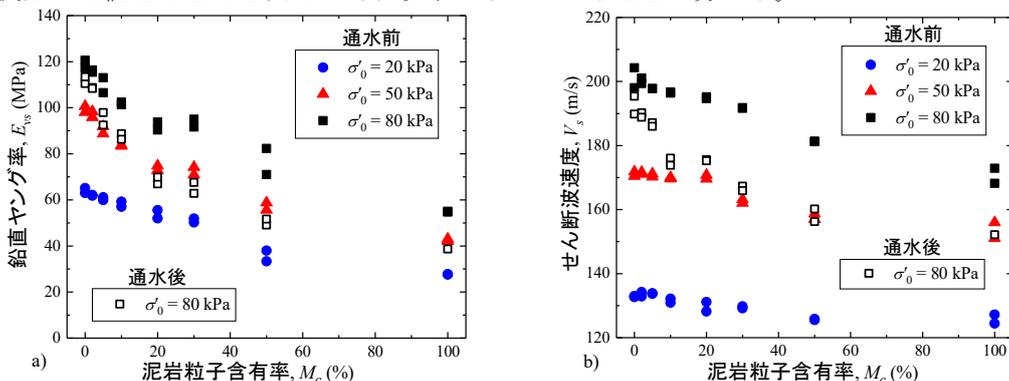


図 12 泥岩粒子含有率との相関関係：a) E_{vs} 、b) V_s

(8) 乾湿繰返し作用を与えた供試体を用いた三軸液状化試験の結果

図 13(a)は、Mudstone 30%について、乾湿繰返し作用を与えた場合と与えない場合（せん断直前の間隙比はそれぞれ 0.657, 0.696）の有効応力経路を示している。前者の方が間隙比が小さいにもかかわらず N_c が小さかった。乾湿繰返し作用による高密度化の影響は応力経路の初期に現れているが、同作用による骨格構造の劣化の影響は平均有効主応力 p' が低いところで生じているように思われる。図 13(b)は、 E_{vs} とせん断剛性 G_{vhd} (=乾燥密度 $\times (V_s)^2$) を間隙比関数 $f(e)$ (= $(2.17-e)^2/(1+e)$) により正規化した値に対する乾湿繰返し回数の影響を示している。乾湿繰返し作用により剛性が低下していく傾向が窺える。(7)と(8)の結果から、泥岩を含む盛土の骨格構造の健全度は、原位置 PS 検層により S 波速度をモニタリングすることで評価できる可能性がある。

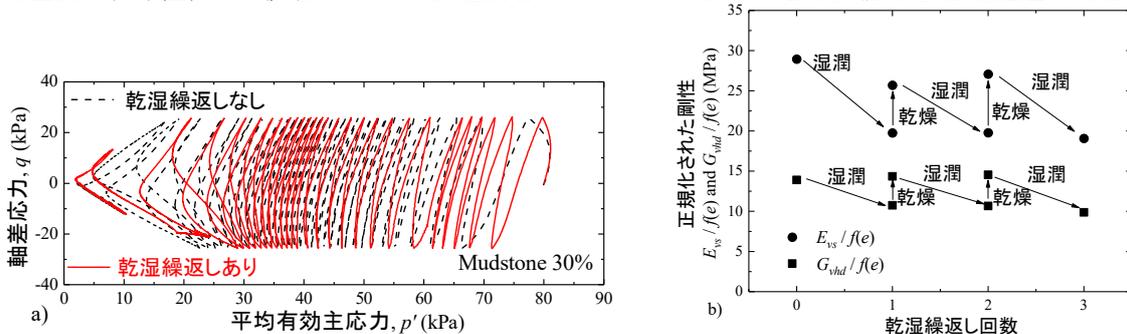


図 13 乾湿繰返し作用を与えた供試体の三軸液状化試験の結果：a) 有効応力経路、b) 剛性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 榎本忠夫、久保和幸	4. 巻 16
2. 論文標題 近年の地震被害から評価した道路盛土の設計水平震度	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 235-245
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3208/jgs.16.235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 榎本忠夫	4. 巻 15
2. 論文標題 細粒分を含む砂の複数回液状化挙動	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 281-293
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 根本崇生、榎本忠夫
2. 発表標題 一次元圧縮下における破碎泥岩粒子のスレーキング挙動の可視化
3. 学会等名 第49回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤雄紀、榎本忠夫
2. 発表標題 泥岩粒子を含む砂の乾湿繰返しに伴う剛性の変化
3. 学会等名 第17回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小口公、榎本忠夫
2. 発表標題 一次元圧縮条件下における破碎泥岩のスレーキング現象の可視化に関する試み
3. 学会等名 第48回関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎本忠夫
2. 発表標題 泥岩粒子を含む砂の液状化挙動
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関